

DOI: 10.20103/j.stxb.202302170271

闫丰, 庞娇, 安晓明, 徐佳音, 代鹏宇, 刘鑫, 申琳, 陈永霞, 陈亚恒. 基于修正碳账户的京津冀县域生态补偿量化及优先级分区. 生态学报, 2023, 43(20): 8332-8343.

Yan F, Pang J, An X M, Xu J Y, Dai P Y, Liu X, Shen L, Chen Y X, Chen Y H. Quantification and priority zoning of ecological compensation at county level in Beijing-Tianjin-Hebei based on modified carbon account. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(20): 8332-8343.

基于修正碳账户的京津冀县域生态补偿量化及优先级分区

闫 丰^{1,2}, 庞 娇³, 安晓明³, 徐佳音³, 代鹏宇³, 刘 鑫³, 申 琳³, 陈永霞³, 陈亚恒^{1,2,*}

1 河北农业大学国土资源学院, 保定 071001

2 河北省农田生态环境重点实验室, 保定 071001

3 河北农业大学渤海学院, 黄骅 061100

摘要:随着我国生态文明进程的不断加快,生态补偿的作用也日益凸显。京津冀作为我国的重要经济区,其经济发展的同时也伴随着大量的碳排放,为促进京津冀一体化战略的深入实施与生态环境建设,基于修正碳账户,选择模型构建法、空间相关性分析与重心迁移等手段,以县域为评价单元对京津冀地区进行生态补偿标准量化和优先级分区研究。结果表明:(1)修正前的京津冀地区碳账户呈现西北低,东南高的趋势,而修正后的碳账户由于兼顾了区域间本地差异,空间分布更加均匀;(2)生态补偿额度高-高聚集区主要分布于北京周边、石家庄周边以及邯郸-邢台一带,生态补偿额度低-低聚集区主要集中在京津冀地区北部县域;(3)京津冀生态补偿额度重心在 115°45′—116°2′E, 38°10′—38°20′N(献县和饶阳县)范围内移动,整体呈现由东北向西南变化的趋势;(4)2007 年到 2017 年生态补偿支付区前五名(大厂回族自治县、柏乡县、新河县、海兴县、任县)和受偿区前五名(尚义县、阜平县、沽源县、康保县、赤城县)基本保持稳定。研究结果为京津冀协同发展制定相应减排固碳政策有重要参考价值,为实现双碳目标有促进作用。

关键词:生态补偿;碳账户;重心迁移;优先级分区;京津冀

Quantification and priority zoning of ecological compensation at county level in Beijing-Tianjin-Hebei based on modified carbon account

YAN Feng^{1,2}, PANG Jiao³, AN Xiaoming³, XU Jiayin³, DAI Pengyu³, LIU Xin³, SHEN Lin³, CHEN Yongxia³, CHEN Yaheng^{1,2,*}

1 College of Land and Resources, Hebei Agricultural University, Baoding 071001, China

2 Key Laboratory for Farmland Eco-Environment of Hebei Province, Baoding 071001, China

3 Bohai College, Hebei Agricultural University, Huanghua 061100, China

Abstract: Ecological compensation mechanism is an important part of China's ecological civilization system and an important means to achieve the goal of carbon peak and carbon neutrality, with the continuous acceleration of China's ecological civilization, the role of ecological compensation is also becoming increasingly prominent. As an important economic zone in China, with the characteristics of high population density and high industrial cluster, the economic development of Beijing-Tianjin-Hebei region is accompanied by a large amount of carbon emissions. To promote the in-depth

基金项目:河北省高等学校人文社会科学研究项目(SQ2022070);河北省省属高等学校基本科研业务费研究项目(KY2022079);河北省科技计划软科学研究项目(22557682D);河北省研究生创新资助项目(CXZZBS2022041)

收稿日期:2023-02-17; **采用日期:**2023-07-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chenyaheng@126.com

implementation of the Beijing-Tianjin-Hebei integration strategy and ecological environment construction, this paper is based on the revised carbon account and uses the model construction method, spatial correlation analysis, and center of gravity shift to quantify ecological compensation standards and prioritize zoning research in the Beijing-Tianjin-Hebei region with counties as evaluation units. The results show that: (1) the unrevised carbon accounts show a trend of low in the northwest and high in the southeast of the Beijing-Tianjin-Hebei region, while the revised carbon accounts are more evenly spatially distributed due to taking local differences between regions into account. (2) The high-high ecological compensation amount is mainly distributed around Beijing, around Shijiazhuang, and Handan-Xingtai, while the low-low ecological compensation amount is mainly concentrated in the northern counties of the Beijing-Tianjin-Hebei region, the number of each cluster area showed a change trend of "increase first and then decrease later". (3) The center of gravity of ecological compensation amount in Beijing, Tianjin and Hebei Province moves within $115^{\circ}45'—116^{\circ}2' E$, $38^{\circ}10'—38^{\circ}20' N$ (Xian County and Raoyang County), with an overall trend from northeast to southwest, while in some years, the center of ecological compensation is reproduced from the southwest to the northeast. (4) The top five ecological compensation payment areas (Dachang Hui Autonomous County, Baoxiang County, Xinhe County, Haixing County, and Ren County) and the top five compensation areas (Shangyi County, Fuping County, Guyuan County, Kangbao County, and Chicheng County) remained basically stable from 2007 to 2017. The amount of ecological compensation in the overall payment area is greater than the amount of ecological compensation in the compensation area, and the top 20 regions of compensation subject and compensation receptor can basically realize the balance of ecological compensation at the county level. The results of this paper have important reference values for the development of corresponding emission reduction and carbon sequestration policies for the synergistic development of Beijing, Tianjin and Hebei, and contribute to the realization of the dual carbon goals.

Key Words: ecological compensation; carbon account; focus migration; priority partition; Beijing-Tianjin-Hebei region

随着我国生态文明进程的不断加快,生态补偿的作用也日益凸显^[1]。2021年9月,中国共产党中央委员会办公厅、中华人民共和国国务院办公厅印发的《关于深化生态保护补偿制度改革的意见》强调需要持续健全生态补偿机制,激发生态环境高质量发展。加快推动绿色低碳发展,推进生态补偿建设是我国“十四五”规划提出的重要方向^[2-5]。开展生态补偿机制研究对于协调区域间公平和可持续发展有现实意义,构建合理的生态补偿标准以及确定优先级分区至关重要。

目前国内外学者对于生态补偿标准的研究已取得较大成果,在生态补偿标准量化方法上,已有研究大多采用模型构建法^[6-8]、条件价值法^[9-10]和机会成本法^[11-12]等方法。模型构建法一般指按照“谁收益、谁付费”的原则,构建生态补偿标准计算模型来确定生态补偿标准,通过这种方式确定的补偿标准较为直接、准确,因而被广泛应用;条件价值法一般通过考虑个人的支付意愿(WTP)或接受意愿(WTA)来确定生态补偿标准,进而改善环境质量,提高生态补偿的可操作性。然而,它在很大程度上受到利益相关者的认知和教育水平的影响^[13];机会成本是指为了保护生态系统服务供应区域的生态功能而放弃或失去经济发展机会的成本^[14],补偿标准通常根据投入的直接成本计算,使其更适用于不能直接估计社会和经济效益的情况^[15]。在生态补偿研究对象方面,国内外现有研究中既关注流域水资源管理^[16],森林^[17-18],草原^[19-20]和环境保护和恢复^[21]等单一方面,也关注省域^[22-23]、县域^[24]、城市群^[25-26]等区域、整体方面的研究,总体研究涉及对象较为全面、丰富。

京津冀地区具有较高的人口密度,产业集群集中,具有极大的发展潜力,在快速工业化和城镇化的驱动下,将不可避免地导致环境污染和碳排放^[27-28],基于京津冀地区的县域发展层面研究,对于合理有效地解决京津冀地区的碳中和问题,深入探讨京津冀地区碳减排合理治理机制具有重要意义。关于生态补偿量化的研究虽然不少,但仍然存在一些不足之处,譬如碳排放和碳吸收核算范围不一致,研究跨度偏短,导致结果不具有普遍性;研究尺度下沉到县域级别的研究较少;建模过程中较少考虑区域人口、面积和国内生产总值

(GDP)等本底差异。因此为有效促进区域碳减排,实现区域间效率和公平的协调发展,本文基于修正碳账户从京津冀县域视角下进行生态补偿研究,为考虑区域内人口、面积和 GDP 的影响因素,在已有模型上更新碳账户敏感度系数,通过 ArcGIS 等软件开展生态补偿量化及其时空分异特征研究,并首次研究分析了京津冀县域视角下生态补偿额的重心转移规律,最后对京津冀地区各县进行了生态补偿优先级分区,以期为京津冀构建完善的生态补偿机制提供相关参考。

1 研究区概况

如图 1 所示,京津冀地区是中国的“首都圈”,具体包括北京市、天津市和河北省,位于 $113^{\circ}27'—119^{\circ}50'E$, $36^{\circ}05'—42^{\circ}40'N$ 。京津冀地处华北平原,西临黄土高原,东临渤海。该地区西为太行山山地,北为燕山山地,燕山以北为张北高原,其余为海河平原。三地中北京市以山地为主,山地面积约占 62%。天津市以平原为主,平原比例超过 90%。河北省地形多样,主要包括山地、平原和高原。京津冀地区整体地势呈西北高、东南低的特征,总面积为 21.6 万 km^2 ,其中该区域的耕地所占面积为 6.5 万 km^2 ,占全国的 5.0%;林地所占面积为 7.5 万 km^2 ,占全国的 2.6%;园地所占面积为 1.2 万 km^2 ,占全国的 5.8%;草地所占面积为 2.0 万 km^2 ,占全国的 0.7%;湿地所占面积为 0.2 万 km^2 ,占全国的 0.8%。因区域森林覆盖率低、林地质量不高以及林地品种过于单一等原因使得京津冀区域生态系统脆弱、生态承载力较低。京津冀区域作为主体城市化区域和核心经济发展区,其健康可持续发展会在很大程度上推动我国经济、生态持续发展。

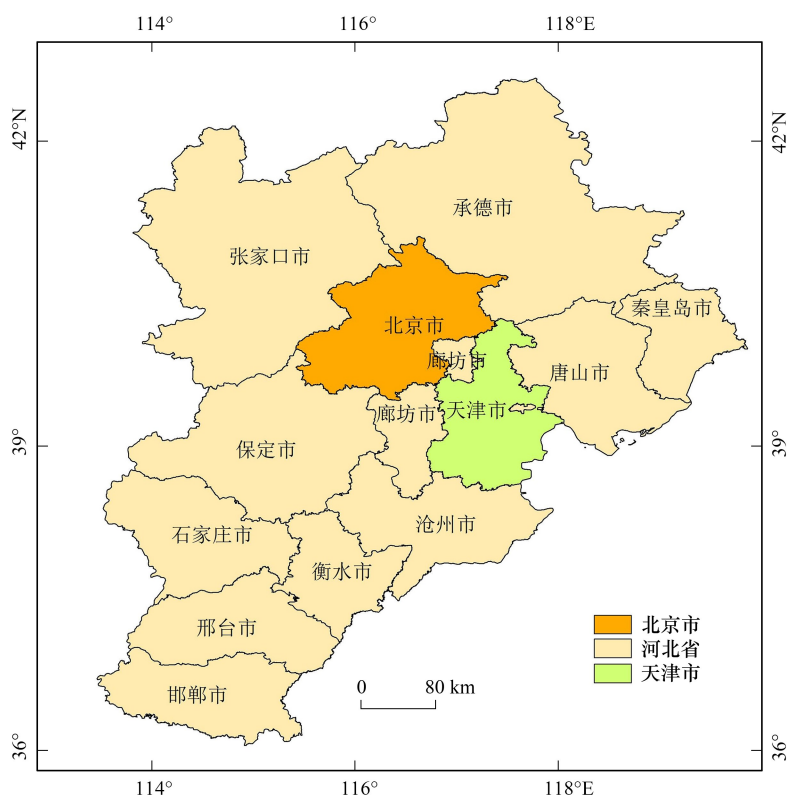


图 1 京津冀区位图

Fig.1 Beijing-Tianjin-Hebei location map

2 数据与方法

2.1 碳排放与碳吸收模型

碳排放:考虑到县域统计年鉴公布年份的不连续性和部分区县数据的缺失,自下而上获取县域精确的化

石能源消耗数据十分困难,因此本次研究引用中国碳核算数据库的 2007—2017 年的县域碳排放数据作为基础数据进行后续研究。

碳吸收:根据中国科学院土地资源分类系统,选取林地和草地、灌木、近海、湿地 5 种土地利用类型开展区域碳吸收测算,对应的二级分类及其碳承载系数见表 1。本系数参考刘晓凤^[29]对碳承载系数的划分,将区域碳承载力分为陆地碳承载力与湿地碳承载力,其中陆地碳承载力包括森林、灌木林、草原;湿地碳承载力包括近海与湿地。本文测算模型如下^[30]:

$$C_a = \sum C_i = \sum_{i=1}^n A_i \times P_i \quad (1)$$

式中, C_a 为碳吸收量; C_i 为第 i 种土地利用类型的碳吸收; A_i 为第 i 种土地利用类型的面积; P_i 为第 i 种土地利用类型的碳承载系数。

表 1 碳承载系数表

Table 1 Table of carbon bearing coefficient

类别 Types	细分 Subsections	碳吸收能力/($\text{t hm}^{-2} \text{a}^{-1}$) Carbon absorption capacity
陆地 Land	森林与灌木	3.8096
	草原	0.9482
湿地 Wet land	近海与湿地	5.7000

2.2 生态补偿模型

通过以上碳排放与碳吸收模型,可以得到区域碳账户,见公式:

$$C_s = C_e - C_a \quad (2)$$

式中, C_s 为修正前碳账户, C_e 是碳排放总量。但此时的碳账户是忽略了区域人口、面积和 GDP 的绝对数据,欠缺了一定的公平性,因此更新了碳账户敏感度系数^[31]:

$$M = \frac{C_s}{R \times D \times \text{GDP}} \quad (3)$$

式中, R 、 D 、GDP 分别为区域人口、面积和地区生产总值。

区域间生态补偿应以区域内碳账户敏感度的相对大小作为参考,进而得到修正后碳账户,具体算法如下:

$$C'_s = C_{\frac{M_k}{M_{\text{总}}}} - \bar{C} \quad (4)$$

式中, C'_s 为第 s 区块的修正后碳账户; $C_{\frac{M_k}{M_{\text{总}}}}$ 为研究区内所有碳账户的总和, t/a ; $\bar{C}$ 为研究区内碳账户算术平均值, t/a ; M_k 为研究区内第 k 区块的碳账户敏感度, $\text{t 万元}^{-1} \text{人}^{-1} \text{hm}^{-2} \text{a}^{-1}$; $M_{\text{总}}$ 为研究区内碳账户敏感度总和, $\text{t 万元}^{-1} \text{人}^{-1} \text{hm}^{-2} \text{a}^{-1}$ 。

修正后碳账户为负值,意味着第 k 区县属于补偿受体,会接受其他区县相应额度的补偿款,反之则是补偿主体,应补偿给其他区县相应的补偿款。修正后碳账户综合考虑了区域内人口数量、面积和 GDP 对生态补偿的影响,碳账户用碳账户敏感度相对大小作为衡量区域间的补偿量的标准更具科学性,最终在考虑碳交易价格的基础上得到了区域生态补偿额度,其中碳交易价格为中国 2013—2017 年碳交易市场中交易价格的平均值(20.51 元/ t)。生态补偿价格为正值时表示该区域需要支付金额,反之则得到补偿。根据各年的碳交易的价格计算补偿额度,公式如下:

$$\text{BCE}_k = C'_s \times V_{\text{CO}_2} \quad (5)$$

式中, BCE_k 为 k 区域的补偿额度; V_{CO_2} 为碳交易价格,取 20.51 元/ t 。

2.3 生态补偿优先级模型

生态补偿优先级指相较于经济发展水平较高的地区,经济发展水平较低的地区对生态补偿额的需求迫切

程度更高些,基于这一原则来确定各地区生态补偿的优先顺序。陈儒、姜志德在王女杰等对于生态补偿优先级的研究基础上进行了修正,最终得到关于计算生态补偿优先级的指标,并给出了具体形式^[32](见式 6)

$$|CCPS_i| = \frac{C'_s \times V_{CO_2}}{GDP_i} \tag{6}$$

式中, GDP_i 为*i*地 GDP, V_{CO_2} 为单位碳价, $|CCPS_i|$ 为*i*地区修正后生态补偿优先级, $|CCPS_i|$ 值的大小代表生态补偿资金对地区的重要程度,如果 $|CCPS_i|$ 计算值较大时,表示该地区获得或支付生态补偿资金对其经济状况影响较大,即获得生态补偿的迫切度较高或者应当率先支付生态补偿资金,反之则反。因此,当某地为碳盈余区,应该被补偿,同时 $CCPS_i < 0$, $CCPS_i$ 值越小表明该地对生态补偿资金需求迫切,此时 $CCPS_i$ 值越小受补偿顺序越靠前;当某地为碳赤字区,应该支付资金,同时 $CCPS_i > 0$, $CCPS_i$ 值越大表明支付生态补偿资金对当地触动较大,此时的 $CCPS_i$ 越大支付顺序越靠前。

综合来看,式 6 表明:对于受偿地区,在其经济发展水平一定的情况下,碳盈余水平越高,其成为优先补偿区的可能性就越大;对于支付地区,在其经济发展水平一定的情况下,碳赤字程度越严重,其成为率先支付区的可能性就越大。

根据 $CCPS_i$ 的结果,可以构建关于生态补偿优先级的评级矩阵^[33],具体如表 2 所示。

表 2 生态补偿优先级评级矩阵
Table 2 Ecological compensation priority rating matrix

生态补偿优先级大小 $CCPS_i$	高值 High value	低值 Low value
正(支付区)Positive (payment area)	优先支付	延后支付
负(受偿区)Negative (compensated area)	延后受偿	优先受偿

$CCPS_i$:生态补偿优先级大小,即碳补偿优先级大小 Carbon compensation priority size

当某地碳排放量等于碳吸收量时,此时 $C_s = CCPS_i = 0$,该地为碳平衡区。

2.4 数据来源

本次研究涉及碳排放、土地利用类型、地区社会经济和中国行政边界数据,具体数据内容见表 3。考虑到行政区划调整和数据的可获得性,将东城区、西城区、海淀区、朝阳区、丰台区和石景山区合并到北京市市辖区;将和平区、河西区、河东区、南开区、河北区和红桥区合并到天津市市辖区;河北省各地级市县区也按相同标准进行相应处理,同时部分县域名称由于数据问题仍沿用原名称,另有个别缺失数据由相近年份数据插值或参考邻近县域数据均值填充。

表 3 数据来源
Table 3 Data sources

数据类别 Data categories	数据来源 Data sources	时间段 Time quantum	备注 Comments
碳排放数据 Carbon emission data	中国碳核算数据库 https://www.ceads.net/user/index.php?id=1057&lang=en	2020 年	县域
土地利用数据 Land use data	武汉大学:1990—2020 中国 30 m 土地覆盖数据集	1990—2020 年	30m
地区社会经济数据 Regional socio-economic data	各省统计年鉴等统计资料	2008—2020 年	县域
行政边界矢量数据 Administrative boundary vector data	全国地理信息资源目录服务系统:1:100 万 全国基础地理数据库	2020 年	1:100 万

3 结果与分析

3.1 碳账户修正前后时空分异特征对比分析

如图 2 所示,2007—2017 年京津冀地区整体呈碳账户增加态势,其中东南部沿海区域碳账户增加趋势尤

为明显。县级尺度碳账户整体呈现京津石为高值中心,并从中心向外逐步降低。时间尺度上,2007 年碳账户高值区域主要包括北京市通州区、天津滨海新区、石家庄市辖区、鹿泉县、正定县,这些地区人口较为集中,经济较为发达,既是生产中心又是消费中心,碳排放量占比较高,碳账户低值区主要分布在京津冀地区北部和西部。与 2007 年相比,2012 年的碳账户低值区减少,高值区数量增加。到 2017 年,碳账户高值区继续增加,主要分布在天津滨海新区、武清县、邯郸市辖区、通州区、大厂回族自治县。空间尺度上,碳账户分布呈现“北低南高”的分布趋势,碳账户低值主要集中于京津冀地区北部,高值则重要集中于东南沿海区域,2007 年与 2012 年碳账户最低值均位于丰宁满族自治县,最高值均位于石家庄市市辖区;2017 年碳账户最低值则位于康保县,最高值位于滨海新区。

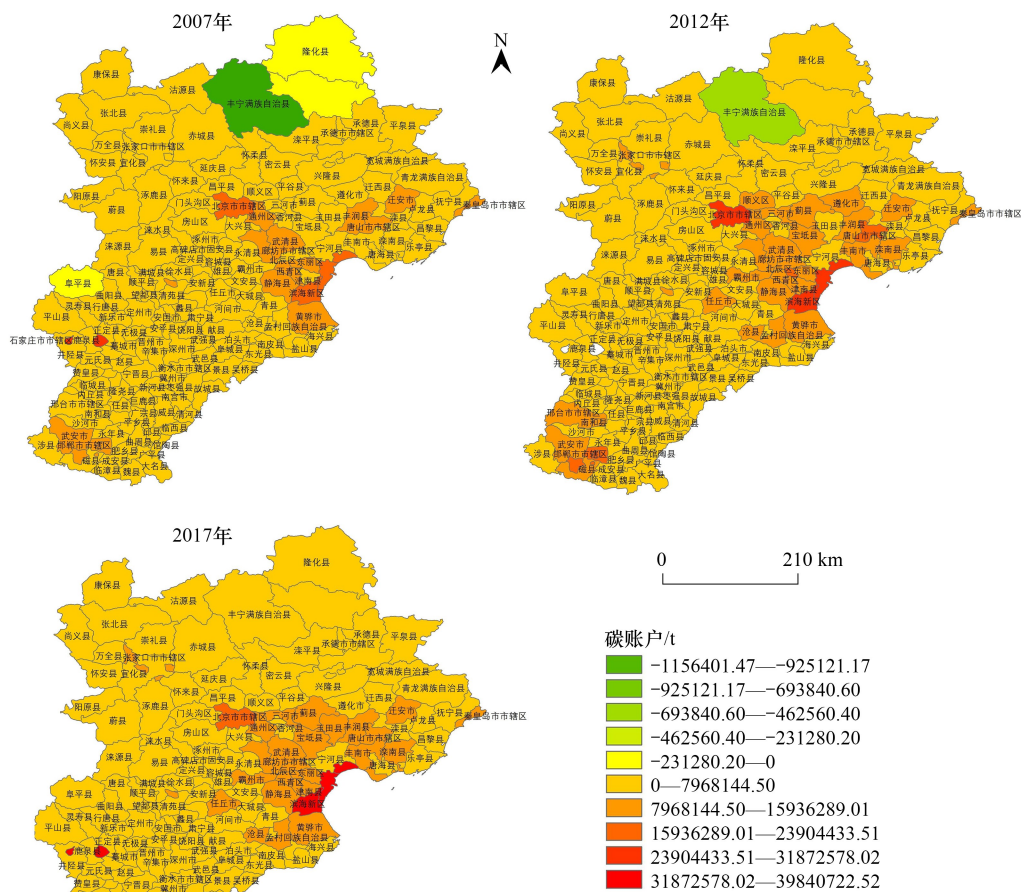


图 2 修正前碳账户时空分异图(2007—2017)

Fig.2 Spatial and temporal division before carbon account correction (2007—2017)

在考虑区域人口、面积和 GDP 后得到修正后碳账户时空分异特征如图 3 所示,2007—2017 年,京津冀整体碳账户呈现“先减后增”的变化趋势。时间尺度上,北部地区碳账户以“先减后增”为主要变化趋势,只有崇礼县呈现出明显的持续递增趋势;中部地区,大厂回族自治县、容城县和雄县等地碳账户逐年递增,其中大厂回族自治县一直是区域峰值,易县、房山区和武清县等地碳账户呈“先减后增”的变化趋势;南部地区,除石家庄市辖区和枣强县呈“先增后减”变化趋势,其余县域基本无明显变化。空间尺度上,碳账户大体呈现“北低南高”的分布趋势,京津冀北部是主要的碳吸收区,南部是主要的碳排放区,中部的大厂回族自治县则是京津冀地区主要的碳账户峰值地区。

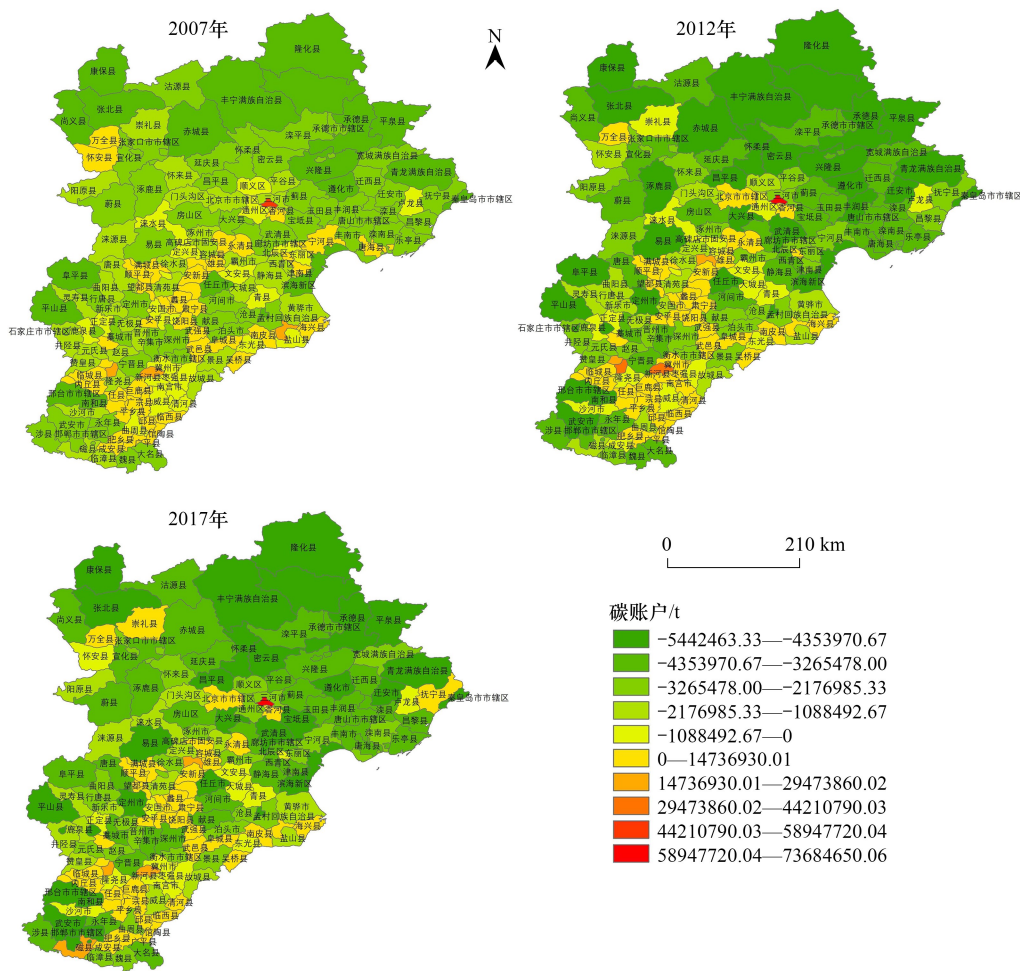


图3 修正后碳账户时空分异图(2000—2017)

Fig.3 Spatial and temporal division after carbon account correction (2000—2017)

对碳账户时空分异进行修正前后对比发现,修正前的京津冀地区碳账户呈现“北低南高”的趋势,而修正后的碳账户分布更加均匀。时间尺度上,修正前的东南沿海区域碳账户变化明显,修正后的东南沿海区域碳账户则变化不明显。空间尺度上,修正前的碳账户分布呈现多峰值的特点,而修正后的碳账户分布则较为平均。

3.2 生态补偿空间相关性及重心迁移分析

3.2.1 局部莫兰指数

由莫兰指数可知空间关联类型分为五类:高-高聚集、低-低聚集、低-高聚集、高-低聚集、不显著。其中高-高聚集、低-低聚集表示正相关性;高-低聚集、低-高聚集表示负相关性。如图4所示,2007、2012、2017三年生态补偿额度的莫兰指数所显示的局部空间相关性较强,东北区域为低-低聚集区,西南区域为高-高聚集区,两区域之间分布个别低-高聚集区。

在2007年生态补偿额度莫兰指数中,低-低聚集区为丰宁满族自治县、承德县、平泉县等17个县,这些县域同其周边的县域的生态补偿额度都较低;高-高聚集区为香河县、海兴县、临城县等10个县域,这些县域与其周边县域的生态补偿额度都比较高;低-高聚集区为三河市、廊坊市市辖区、黄骅市等9个县域,这些县域的生态补偿额度较低,而其周边的县域的生态补偿额度都较高。2012年低-低聚集区减少康保县,增加了唐山市市辖区、昌黎县等7个县域,达到23个县域;低-高聚集区减少盐山县、冀州县,增加赞皇县、赵县和南宫市,达到10个县域;高-高聚集区减少海兴县,新增柏乡县、新河县等7个县域,达到16个县域。2017年低-低聚

集区较 2012 年减少平泉县、青龙满族自治县、涉县和磁县,达到 19 个县域;低-高聚集区减少赞皇县、赵县,增加房山区、盐山县、冀州市,达到 9 个县域;高-高聚集区减少香河县、新河县、冀州市、清河县,达到 12 县域,新增一个高-低聚集区磁县。

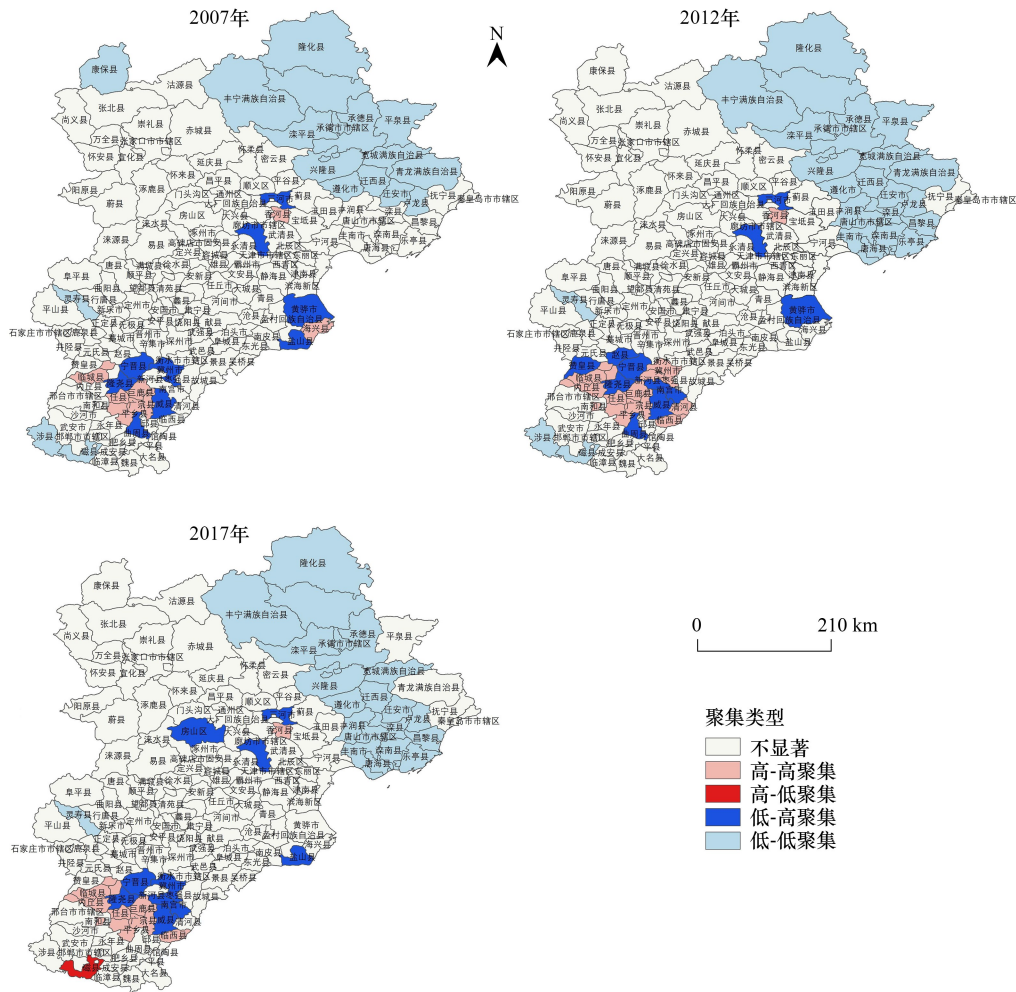


图 4 生态补偿额度莫兰指数(2007—2017)

Fig.4 The moran index (2007—2017)

3.2.2 重心迁移规律

由图 5 可知,2007—2017 年间的生态补偿额度重心大体在 $115^{\circ}45'E$ — $116^{\circ}2'E$, $38^{\circ}10'N$ — $38^{\circ}20'N$ 范围内移动,即在献县、饶阳县两地变换。研究时间内大致分为三个阶段:其中 2007 年到 2010 年由($116^{\circ}2'E$, $38^{\circ}20'N$)移动到($115^{\circ}45'E$, $38^{\circ}9'N$),约 577 km,2007 年到 2009 年转移速度较快,2009 年到 2010 年转移速度放缓;2010 年到 2016 年由($115^{\circ}45'E$, $38^{\circ}9'N$)移动到($115^{\circ}51'E$, $38^{\circ}17'N$),约 300 km,2010 年到 2012 年沿正北方向移动大约 60 km,2013 到 2016 年向东北方向前进 200 多 km;2016 年到 2017 年又从($115^{\circ}51'E$, $38^{\circ}17'N$)移动到($115^{\circ}45'E$, $38^{\circ}11'N$),向西南移动约 315 km,11 年间整体变化趋势呈现由东北向西南迁移的规律,其中,2012 年至 2017 年出现短暂地往复运动。

3.3 生态补偿优先级分区分析

根据式(6)及相关数据对 2007、2012 和 2017 年三年生态补偿优先级进行计算,结果如表 4 所示。由于篇幅限制,选择 3 个年份支付区和受偿区优先级前 10 的县区进行展示。2007 和 2012 年支付区都为 47 个,受偿区都为 121 个,2017 年支付区 48 个,受偿区 120 个。支付区与受偿区数量比为 1:3;2007 支付区补偿额为

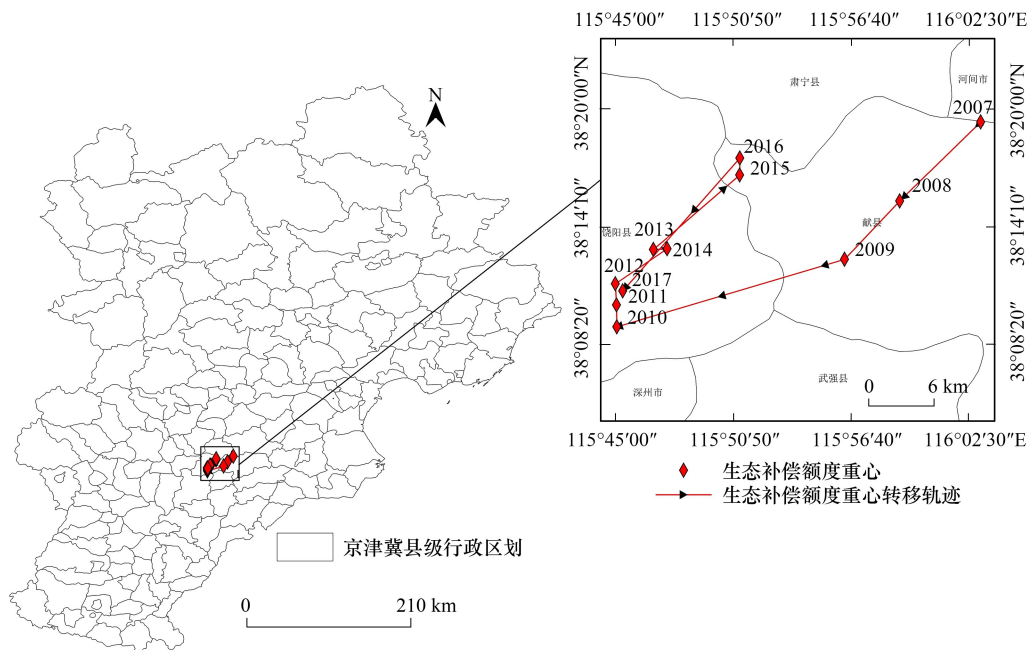


图 5 生态补偿额度重心迁移图(2007—2017)

Fig.5 Center of gravity migration diagram of ecological compensation quota (2007—2017)

表 4 2007、2012 和 2017 年生态补偿优先级

Table 4 Ecological compensation priority in 2007,2012 and 2017

类别 Sorts	优先级顺序 Priority order	2007		2012		2017	
		县 County	CCPS _i	县 County	CCPS _i	县 County	CCPS _i
支付区 Payment zone	1	大厂回族自治县	0.3933	柏乡县	0.2917	柏乡县	0.1401
	2	柏乡县	0.2715	新河县	0.2827	新河县	0.1210
	3	新河县	0.2461	大厂回族自治县	0.1876	大厂回族自治县	0.1186
	4	孟村回族自治县	0.1183	任县	0.0867	容城县	0.0822
	5	海兴县	0.1107	海兴县	0.0856	海兴县	0.0522
	6	任县	0.1017	南和县	0.0831	磁县	0.0458
	7	高邑县	0.0966	平乡县	0.0717	任县	0.0448
	8	平乡县	0.0947	高邑县	0.0660	南和县	0.0430
	9	南和县	0.0722	容城县	0.0591	平乡县	0.0369
	10	望都县	0.0715	广宗县	0.0504	高邑县	0.0348
类别 Sorts	优先级顺序 Priority order	2007		2012		2017	
		县 County	CCPS _i	县 County	CCPS _i	县 County	CCPS _i
受偿区 Compensated area	1	尚义县	-0.0631	阜平县	-0.0343	尚义县	-0.0199
	2	阜平县	-0.0551	尚义县	-0.0306	康保县	-0.0193
	3	沽源县	-0.0519	康保县	-0.0269	阜平县	-0.0174
	4	康保县	-0.0492	沽源县	-0.0250	沽源县	-0.0142
	5	赤城县	-0.0338	赤城县	-0.0155	赤城县	-0.0137
	6	崇礼区	-0.0242	丰宁满族自治县	-0.0141	涿鹿县	-0.0101
	7	张北县	-0.0223	张北县	-0.0135	丰宁满族自治县	-0.0100
	8	涿鹿县	-0.0218	涿鹿县	-0.0128	蔚县	-0.0090
	9	隆化县	-0.0193	兴隆县	-0.0118	张北县	-0.0089
	10	丰宁满族自治县	-0.0168	易县	-0.0114	兴隆县	-0.0087

45.16 亿元,受偿区为 12.4 亿元。2012 年支付区补偿额为 62.16 亿元,受偿区为 16.89 亿元。2017 年支付区补偿额为 59.71 亿元,受偿区为 16.35 亿元。支付区总支付额与受偿区总受偿额之比近似为 3:1,结合数量比分析,可以基本推断京津冀县域层面能够实现生态补偿额的整体收支平衡。从表 4 可以看出,2007 年、2012 年和 2017 年 3 年的受偿区与支付区生态补偿额优先级前 10 的区县基本稳定不变,只在内部发生一定的次序变化,大厂回族自治县、柏乡县和新河县一直是排名前三的支付区,康保县除去 2007 年,在 2012 年和 2017 年与尚义县和阜平县一直是排名前三的受偿区。同时,可以看到大部分支付区的补偿额多于受偿区的补偿额。综上推断,京津冀地区 2007 年到 2017 年 11 年间生态补偿优先级顺序变化不大,整体支付区生态补偿额大于受偿区补偿额,可以基本实现京津冀地区生态补偿收支平衡。

4 讨论

本文对 2007—2017 年京津冀县域生态补偿标准和优先级分区进行了深入研究,根据京津冀 2007—2017 年各年份的碳排放量与碳吸收量计算出京津冀各县域碳账户,但此时的碳账户是忽略了区域人口、面积和 GDP 的绝对数据,欠缺了一定的公平性,因此更新了碳账户敏感度系数并计算了修正后碳账户,最终综合考虑 2013—2017 年间的碳价格,计算出各县域每年的生态补偿额度,使用局部莫兰指数探究了各县域不同年份的生态补偿额度时空分异特征,并利用 ArcGIS 绘制了生态补偿额度重心转移路径图,最后对各县域的补偿优先级进行了分区排名。

4.1 碳账户时空特征

考虑到碳账户的公平性,本文通过增加区域人口、面积和 GDP 三个因素构建出碳账户敏感度系数,对碳账户进行修正。修正后的碳账户分布较为平均,更具公平性,同时,发现修正后碳账户分布在空间尺度上,大体呈现“北低南高”的分布趋势,京津冀北部是主要的碳吸收区,南部是主要的碳排放区,中部的大厂回族自治县则是京津冀地区一个孤立的碳账户峰值地区,这与夏四友等^[34]的研究一致。由于区域经济差异性的存在,工业发达、人口密集、经济增速快的地区,一般是主要的碳排放区域,而相对技术水平较低、经济发展较落后的区域,则是主要的碳吸收区域^[35],这就为后期开展生态补偿提供了前提条件。

4.2 生态补偿空间相关性和重心迁移

通过对京津冀地区生态补偿额度的莫兰指数分析可知,生态补偿额度高-高聚集区主要位于北京附近、石家庄周边以及邯郸—邢台三个主要地区,生态补偿额度低-低聚集区主要集中分布在京津冀地区北部县域。主要原因是京津冀北部地广人稀,人类经济活动对于生态环境破坏较小,适宜植被生长,因此碳吸收能力较强;而北京、石家庄、邯郸等地附近,经济发展水平较高,人口密度大,对环境的影响较强烈,因此碳排放较多,张正峰等^[36]的研究同样也得出这个结论。

相较于生态补偿额度相关的其他文章,本文首次探究了京津冀生态补偿额度的重心转移规律,发现生态补偿额度重心在 2007—2017 年间曲折移动,但整体是由东北向西南方向转移,这一结果符合修正后碳账户的空间分布特征,2012—2017 年间生态补偿额度重心出现由西南方向到东北方向的往复运动,这可能受到当地社会经济政策的影响。

4.3 生态补偿优先级分区

现有成果大都以 GDP 为参考指标,Wang 等^[37]将补偿额度同区域 GDP 进行比较,Yu 等^[38]计算了补偿能力,以区域人均 GDP 之比作表示。本文选择 GDP 作为优先级分区参考指标,在生态补偿优先级分区方面,支付区总生态补偿额与受偿区总生态补偿额之比近似为 3:1,支付区与受偿区数量比近似为 1:3,综合补偿金额比与数量比,可以基本推断京津冀县域层面能够实现生态补偿额的整体收支平衡。2007 年、2012 年和 2017 年 3 年的受偿区与支付区生态补偿额优先级前 10 的区县基本稳定不变,只在内部发生一定的次序变化,大厂回族自治县、柏乡县和新河县一直是排名前三的支付区,康保县除去 2007 年,在 2012 年和 2017 年与尚义县和阜平县一直是排名前三的受偿区。同时,可以看到大部分支付区的补偿额多于受偿区的补偿额。综上推

断,京津冀地区 2007 年到 2017 年 11 年间生态补偿优先级顺序变化不大,整体支付区生态补偿额大于受偿区补偿额,可以基本实现京津冀地区生态补偿收支平衡。

4.4 模型方法的优势与不足

本文通过结合研究区人口、面积和生产总值对碳账户敏感系数进行了更新,进而构建出修正后的生态补偿模型,修正后的模型使碳账户的公平性得到充分体现;将修正前后的碳账户时空分异进行对比,可得京津冀碳收支概况,通过局部莫兰指数及重心迁移分析进一步解释县域水平上的生态补偿额度的局部演化特征以及空间分布上的异质性。但是本文仍然存在局限性:(1)生态补偿模型涵盖多个方面和多个领域,单一指标确定的生态补偿标准会有失公允,需要通过实地调查进行验证^[39]。(2)由于数据的可获得性限制,本文的模型验证仅仅对 2007—2017 年的生态补偿进行分析,研究结果存在时间上的局限性,可以通过加强未来变化趋势的跟踪和研究来进一步深化研究内容^[40]。(3)现行的生态补偿有政策扶持、社会保障等多种补偿模式,因此可以从多角度、多层次进行生态补偿的研究,进一步提高补偿的有效性和现实操作性^[41]。

5 结论

基于 2007—2017 年京津冀县域碳排放与碳吸收数据,采用模型构建、局部莫兰指数、重心迁移模型等研究方法,对研究区生态补偿额度的时空异质性进行了分析,具体结论如下:

(1)对比碳账户修正前后时空分布特征后发现,修正前的京津冀地区碳账户呈现西北低,东南高的趋势,而修正后的碳账户分布更加均匀。时间尺度上,修正前的东南部沿海区域碳账户变化明显,修正后碳账户则变化不显著。空间尺度上,修正前的碳账户分布呈现多峰值的特点,而修正后的碳账户分布则较为平均。

(2)2007 年、2012 年、2017 年这三年京津冀生态补偿额度空间分布有明显聚集规律,东北区域为低-低聚集区,西南区域为高-高聚集区,两区域之间分布个别低-高聚集区。时间尺度上,各聚集区数量呈现“先增加后减少”变化趋势;2007—2017 年生态补偿额度重心在 115°45′—116°2′E,38°10′—38°20′N 范围内移动,即在献县、饶阳县两地变换,整体呈现由东北向西南的趋势,直线移动距离约为 420 km。

(3)京津冀地区 2007 年到 2017 年 11 年间生态补偿优先级顺序变化不大,能够实现县域层面的生态补偿额收支平衡。支付区排名前三的县区为大厂回族自治县、柏乡县和新河县;康保县除去 2007 年,在 2012 年和 2017 年与尚义县、阜平县均位列受偿区前三。

参考文献(References):

- [1] 董海宾,刘思博, Bolormaa Damdinsuren, 侯向阳. 基于 CiteSpace 的国内生态补偿研究. 生态学报, 2022, 42(20): 8521-8529.
- [2] 冯辉,张艺. 生态保护补偿机制建设的法律保障——以地方政府生态补偿对赌协议为例. 中国特色社会主义研究, 2022, 13(S1): 46-55.
- [3] 孙久文,王邹. 新时期京津冀协同发展的现状、难点与路径. 河北学刊, 2022, 42(3): 142-151.
- [4] 孙铮,孙久文. “十四五”期间京津冀协同发展的重点任务初探. 河北经贸大学学报, 2020, 41(6): 57-65.
- [5] 璩爱玉,董战峰,彭忱,周全,郗晗彤. “十四五”时期京津冀地区水环境管理体制体制改革研究. 环境保护, 2021, 49(15): 12-16.
- [6] 杨海乐,危起伟,陈家宽. 基于选择容量价值的生态补偿标准与自然资源资产价值核算——以珠江水资源供应为例. 生态学报, 2020, 40(10): 3218-3228.
- [7] Rees W, Wackernagel M. Urban ecological footprints: why cities cannot be sustainable—and why they are a key to sustainability. Environmental Impact Assessment Review, 1996, 16(4/5/6): 223-248.
- [8] 官冬杰,姜亚楠,严聆云,周健,和秀娟,殷博灵,周李磊. 基于生态足迹视角的长江流域生态补偿额度测算. 生态学报, 2022, 42(20): 8169-8183.
- [9] Kong F B, Xiong K, Zhang N. Determinants of farmers' willingness to pay and its level for ecological compensation of Poyang Lake wetland, China: a household-level survey. Sustainability, 2014, 6(10): 6714-6728.
- [10] 林黎阳,许丽忠,胡军,韩智霞,游武. 基于条件价值法的行业生态补偿标准的确定——以福建省宁德市石材行业生态补偿为例. 环境科学学报, 2014, 34(1): 259-264.
- [11] 赖敏,陈凤桂. 基于机会成本法的海洋保护区生态保护补偿标准. 生态学报, 2020, 40(6): 1901-1909.
- [12] 李晓光,苗鸿,郑华,欧阳志云,肖赅. 机会成本法在确定生态补偿标准中的应用——以海南中部山区为例. 生态学报, 2009, 29(9):

4875-4883.

- [13] Dimal M O R, Jetten V. An integrated spatial econometric approach in valuing soil conservation using contingent valuation. *Soil Use and Management*, 2021, 37(2): 377-389.
- [14] Zhou Z X, Sun X R, Zhang X T, Wang Y. Inter-regional ecological compensation in the Yellow River Basin based on the value of ecosystem services. *Journal of Environmental Management*, 2022, 322: 116073.
- [15] Muñoz-Piña C, Guevara A, Torres J M, Braña J. Paying for the hydrological services of Mexico's forests: analysis, negotiations and results. *Ecological Economics*, 2008, 65(4): 725-736.
- [16] Pagiola S, Arcenas A, Platais G. Can payments for environmental services help reduce poverty? an exploration of the issues and the evidence to date from Latin America. *World Development*, 2004, 33(2): 237-253.
- [17] McCarthy S, Matthews A, Riordan B. Economic determinants of private afforestation in the Republic of Ireland. *Land Use Policy*, 2003, 20(1): 51-59.
- [18] 余红红, 杨加猛, 万紫璇. 基于水源涵养服务视角的汀江(韩江)流域森林横向生态补偿标准. *林业科学*, 2023, 59(2): 1-9.
- [19] Wu J J, Skelton-Groth K. Targeting conservation efforts in the presence of threshold effects and ecosystem linkages. *Ecological Economics*, 2002, 42(1/2): 313-331.
- [20] 杨莉, 乔光华. 基于牧民受偿意愿的生态保护红线区草原生态补偿标准研究. *干旱区资源与环境*, 2021, 35(11): 55-60.
- [21] Weigelhofer G, Feldbacher E, Trauner D, Pölz E, Hein T, Funk A. Integrating conflicting goals of the EC water framework directive and the EC habitats directives into floodplain restoration schemes. *Frontiers in Environmental Science*, 2020, 8: 538139.
- [22] 徐婕, 潘洪义, 黄佩. 基于 LUCC 的四川省主体功能区碳排放与生态补偿研究. *中国生态农业学报: 中英文*, 2019, 27(1): 142-152.
- [23] Ding Z M, Yao S B. Theory and valuation of cross-regional ecological compensation for cultivated land: a case study of Shanxi Province, China. *Ecological Indicators*, 2022, 136: 108609.
- [24] 赵荣钦, 刘英, 马林, 李宇翔, 侯丽朋, 张战平, 丁明磊. 基于碳收支核算的河南省县域空间横向碳补偿研究. *自然资源学报*, 2016, 31(10): 1675-1687.
- [25] 张赫, 贺晶, 杨兴源, 彭千芮. 碳增汇目标下县域生态空间的分区及管控策略——以京津冀地区县域为例. *规划师*, 2022, 38(1): 32-40.
- [26] 刘广明. 协同发展视域下京津冀区际生态补偿制度构建. *哈尔滨工业大学学报: 社会科学版*, 2017, 19(4): 36-43.
- [27] 郑德凤, 刘晓星, 王燕燕, 吕乐婷. 中国省际碳足迹广度、深度评价及时空格局. *生态学报*, 2020, 40(2): 447-458.
- [28] 孟庆瑜, 梁枫. 京津冀生态环境协同治理的现实反思与制度完善. *河北法学*, 2018, 36(2): 25-36.
- [29] 刘晓凤. 区域碳锁定资源配置效率研究. *理论月刊*, 2017(4): 5-11.
- [30] 魏庭阳, 张晨, 缪一祎. 福建省碳超载时空格局演化及弱化路径. *生态学报*, 2022, 42(23): 9677-9688.
- [31] 闫丰, 王洋, 杜哲, 陈影, 陈亚恒. 基于 IPCC 排放因子法估算碳足迹的京津冀生态补偿量化. *农业工程学报*, 2018, 34(4): 15-20.
- [32] 陈儒, 姜志德. 中国省域低碳农业横向空间生态补偿研究. *中国人口·资源与环境*, 2018, 28(4): 87-97.
- [33] 曹改改. 基于碳收支核算的中国省域碳补偿问题研究[D]. 成都: 西南财经大学, 2022.
- [34] 夏四友, 杨宇. 基于主体功能区的京津冀城市群碳收支时空分异与碳补偿分区. *地理学报*, 2022, 77(3): 679-696.
- [35] 赵荣钦, 刘英, 李宇翔, 丁明磊, 张战平, 揣小伟, 焦士兴. 区域碳补偿研究综述: 机制、模式及政策建议. *地域研究与开发*, 2015, 34(5): 116-120.
- [36] 张正峰, 张栋. 基于社会网络分析的京津冀地区碳排放空间关联与碳平衡分区. *中国环境科学*, 2023, 43(4): 2057-2068.
- [37] Wang W X, Kuang Y Q, Huang N S. Study on the decomposition of factors affecting energy-related carbon emissions in Guangdong Province, China. *Energies*, 2011, 4(12): 2249-2272.
- [38] Yu G H, Liu D, Liao X Y, Wang T, Tian Q J, Liao Y. Quantitative research on regional ecological compensation from the perspective of carbon-neutral: the case of Hunan Province, China. *Sustainability*, 2017, 9(7): 1095.
- [39] Yang Y H, Zhang X, Chang L R, Cheng Y F, Cao S L. A method of evaluating ecological compensation under different property rights and stages: a case study of the Xiaoqing River Basin, China. *Sustainability*, 2018, 10(3): 615.
- [40] Tang W Y, Wang Q G, Chen H, Zhu Z H. Performance Evaluation of Ecological Compensation at the County Level: A Case Study of Anyuan County in Dongjiang Watershed, China. *Journal of Resources and Ecology*, 2023, 14(2): 252-264.
- [41] 李璐, 夏秋月, 董捷, 张斌. 武汉城市圈县域空间横向碳生态补偿研究——基于土地利用碳收支差异. *生态学报*, 2023, 43(7): 2627-2639.